



5. INTERNACIONALNI NAUČNO-STRUČNI SKUP GRAĐEVINARSTVO - NAUKA I PRAKSA

ŽABLJAK, 17-21. FEBRUARA 2014.

Miloš Stanić¹, Miloš Hranisavljević², Damjan Ivetić³, Aleksandra Kiković⁴

UTICAJ SNIŽENJA PODZEMNE VODE NA SLEGANJE

Rezime

Sleganje tla koje je posledica sniženja nivoa podzemne vode je u velikoj meri zanemaren problem. U radu je ovaj fenomen detaljno analiziran i prikazan je model za proračun sleganja koje je posledica sniženja nivoa podzemne vode. Model se zasniva na proračunu jednodimenzionalne vertikalne deformacije u vremenu i zasnovan je na poznatim teorijskim postavkama i rešenjima, koja su delom prilagođena ovom problemu. Model se zasniva na razdvajanju problema sleganja i dinamike kretanja podzemne vode, što znači da su promene nivoa podzemne vode ulazni podaci za modeliranje sleganja u vremenu.

Ključne reči

sleganje, podzemna voda

EFFECT OF GROUNDWATER LOWERING ON SUBSIDENCE

Summary

Subsidence due to lowering groundwater level, is often neglected problem. Detailed description of the problem is presented in the paper and model for calculating subsidence is elaborated. Model calculates vertical one dimensional deformations in time. It is based on well known theoretical solutions that are slightly adopted to fit this problem. In the presented model, solving the problem of groundwater dynamics and subsidence in time are separated, meaning that change of groundwater levels is input for subsidence calculation.

Key words

subsidence, groundwater

¹ Dipl.ing, docent, Građevinski fakultet, Beograd, Bulevar kralja Aleksandra 73, mstanic@grf.bg.ac.rs

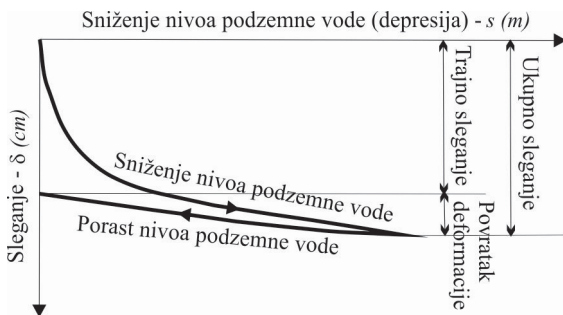
² Dipl.ing, Novkol, Surčinski put 1k, Beograd, Srbija, milhran@gmail.com

³ Dipl.ing, docent, Građevinski fakultet, Beograd, Bulevar kralja Aleksandra 73, damjan.ivetic@gmail.com

⁴ Dipl.ing, Novkol, Surčinski put 1k, Beograd, Srbija, aleksandra@novkol.co.rs

1. UVOD

Sleganje tla, kao posledica sniženja nivoa podzemne vode je problem koji postaje sve aktuelniji. Sa porastom eksploatacije podzemnih voda, dolazi do stalnog opadanja nivoa podzemne vode, što za posledicu ima sleganje tla, koja mogu biti mala i ravnomerna, pa samim tim ostaju nezapažena, ali je u zavisnosti od uslova moguće da dođe i do značajnih oštećenja na objektima i infrastrukturi. Sleganja se javljaju i kada je za potrebe izgradnje objekata potrebno sniziti nivo podzemne vode, kako bi se omogućilo izvođenje radova u suvom. Čak i kada su drenažni sistemi za ove potrebe dobro projektovani i izvedeni, sleganje se neminovno dešava. Kod sniženja nivoa podzemne vode dolazi do povećanja efektivnih pritisaka, pa zemljište postaje zbijenije i smanjuje se koeficijent poroznosti. Sa druge strane, tlo nije elastičan materijal tako da je najveći deo ovih deformacija trajan (slika 1.). Najviše se oko 20% ovih deformacija može vratiti. Očigledno je da postoji potreba da se sleganje u vremenu modelira. Iako već dugo postoje modeli za

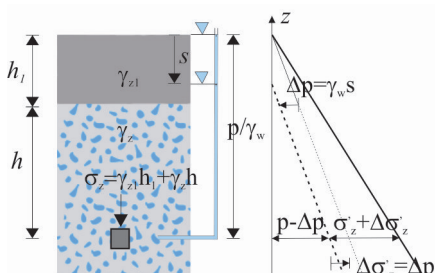


Slika 1. Shematski prikaz uticaja promene nivoa podzemne vode na sleganje tla

simulaciju dinamike podzemnih voda, modeliranje sleganja kao prirodne posledice sniženja nivoa podzemne vode nije postalo deo standardne prakse. Deo razloga leži u činjenici da po pravilu ne postoji dovoljan fond raspoloživih podataka i parametara, na osnovu kojih bi se sleganje moglo pouzdano računati. Deo razloga može biti i nedovoljno dobro razumevanje ovog fenomena.

2. OPIS MODELA SLEGANJA

Sa promenom nivoa podzemne vode menjaju se naponi u tlu. Za slučaj kada postoji vodonosni sloj pod pritiskom iznad koga se nalazi znatno manje propusan povlatni sloj,



Slika 2. Uticaj sniženja nivoa podzemne vode na promenu efektivnih i pornih pritisaka u vodonosnom sloju pod pritiskom

dijagram pornih i efektivnih pritisaka je prikazan na slici 2. Sniženjem nivoa podzemne vode za veličinu depresije s , dolazi do smanjenja pornih pritisaka tla (p) u vodonosnom sloju za $\Delta p = \gamma_w s$, a kako je totalni vertikalni napon u tlu (σ_z) ostao isti, povećanje vertikalnog efektivnog pritiska (σ_z') je jednako promeni pornog $\Delta \sigma_z' = \Delta p$:

$$\sigma_z = (\sigma_z' + \Delta p) + (p - \Delta p)$$

$$\Delta \sigma_z' = \Delta p = \gamma_w s$$

Ako se pretpostavi da sleganje, kao posledica sniženja nivoa podzemne, odgovara pretpostavkama elastične jednodimenzionalne vertikalne kompresije, to podrazumeva sledeću jednostavnu vezu između promene napona i deformacija: $\varepsilon_z = \Delta \sigma_z / M_v$, gde je M_v modul stišljivosti.

Deformacije koje se javljaju kao posledica sniženja nivoa podzemne vode se najčešće, sa dovoljnom tačnošću mogu modelirati kao jednodimenzionalne – vertikalne. Iako se u blizini bunara mogu javiti značajna diferencijalna sleganja koja kompromituju ovu pretpostavku, primena složenijih modela najčešće nije opravdana (složeniji model sleganja je opisan u radu M.Budhu 2009). Sleganje se po pravilu modelira odvojeno od modela dinamike podzemnih voda, pa je promena nivoa podzemne vode ulazna veličina za proračun sleganja, čime se zanemaruje uticaj sleganja na promenu parametara koji utiču na kretanje podzemnih voda.

2.1. TRENUTNO SLEGANJE

Sniženje nivoa podzemne vode, očigledno dovodi do smanjenja pornih i povećanja efektivnih pritisaka tla, što za posledicu neminovno dovodi do sleganja. Sleganje se računa kao integral vertikalne deformacije tla, na delu podužnog profila na kome je došlo do promene efektivnih pritisaka: $\delta = \int \varepsilon_z dz$. Kako se pretpostavlja da sniženje nivoa podzemne vode odgovara pretpostavkama jednodimenzionalne vertikalne kompresije, može se napisati veza između efektivnog napona i deformacije u vertikalnom pravcu u diferencijalnom obliku: $d\varepsilon_z = d\sigma_z' / M_v$, ili prelaskom na integralnu formu, dobija se:

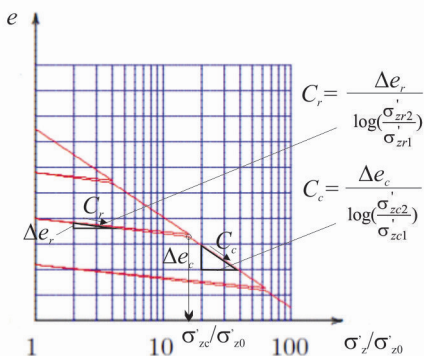
$$\int_0^{\varepsilon_z} d\varepsilon_z = \int_{\sigma_{z0}'}^{\sigma_{z0}' + \Delta\sigma_z'} \frac{d\sigma_z'}{M_v} \quad (1)$$

gde se σ_{z0} odnosi na efektivni pritisak tla pre sniženja nivoa podzemne vode i promene za $\Delta\sigma_z'$.

Linearan elastičan model

Kod linearnog elastičnog modela jednodimenzionalne kompresije, moduo stišljivosti je konstantna vrednost, pa je u tom slučaju, proračun vertikalne deformacije sasvim jednostavan:

$$\varepsilon_z = \frac{\Delta\sigma_z'}{M_v} \quad (2)$$



Slika 3. Koeficijent poroznosti u funkciji promene efektivnih napona pod pritiskom

Primena linearnog modela ima smisla samo u slučajevima kada je promena pornih pritisaka mala u odnosu na efektivne napone u uslovima koji su prethodili sniženju. Osim toga, nije realna primena ovog modela kada treba simulirati vertikalne deformacije u vremenu. U uslovima kada dolazi do porasta nivoa podzemne vode usled isključenja drenažnog sistema ili promene drugih graničnih uslova (porast nivo vode u vodotoku, prihranjivanja iz povlatnog sloja, ...), primenom elastičnog modela, povratak podzemne vode na početni nivo dovodi do toga da se anulira prethodno sleganje, što naravno nije realno.

Nelinearan Tercagijev model

Iako je kod moćnih vodonosnih slojeva, koji imaju veliki koeficijent filtracije i veliki moduo stišljivosti, opravdana primena jednostavnog linearnog modela vertikalne kompresije, kod većine zemljišta uslovi za njegovu primenu nisu opravdani. Očigledno je da linearan elastičan model, ne vodi računa o realnom ponašanju zemljišta, gde sa povećanjem efektivnog napona, raste i modul stišljivosti zemljišta (M_v). Povećanje vertikalne deformacije (ε_z), približno linearno prati logaritam relativnog povećanja efektivnog napona: $M_v = C\sigma'_z$, gde je C bezdimenzionalan parametar koji se naziva konstanta stišljivosti. Zamenom u jednačinu 1, dobija se nelinearan Tercagijev model

sleganja tla: $\varepsilon_z = \frac{1}{C} \ln\left(\frac{\sigma'_{z0} + \Delta\sigma'_z}{\sigma'_{z0}}\right)$. Vrednost C se određuje merenjima na neporemećenim

uzorcima ili na osnovu preporuka iz literature. U praksi se češće koristi parametar indeks stišljivosti (C_c), koji se dobija na osnovu veze između koeficijenta poroznosti (e) i logaritma efektivnog napona (σ'_z) (slika 3). Ovo je u suštini ista veza kao između napona i deformacija kod jednodimenzionalne kompresije, što je i očekivano ako se ima u vidu da je promena koeficijenta poroznosti direktna mera vertikalne deformacije: $\varepsilon_z = \Delta e / (1 + e_0)$, gde je e_0 vrednost koeficijenta poroznosti pre vertikalne deformacije. Korišćenjem indeksa stišljivosti (C_c), dobija se gotovo isti izraz za proračun vertikalne deformacije:

$$\varepsilon_z = \frac{C_c}{1 + e_0} \log\left(\frac{\sigma'_{z0} + \Delta\sigma'_z}{\sigma'_{z0}}\right) \quad (3)$$

pri čemu je očigledno da postoji jednostavna veza između dva parametra: $2.3/C = C_c / (1 + e_0)$. Nelinearni model sleganja je znatno realniji, posebno za primenu u slojevima koji imaju manje koeficijente filtracije i manje module stišljivosti. Osim toga ovim modelom je moguće obuhvatiti i slučaj povišenja nivoa podzemne vode, kada dolazi do porasta pornih i smanjenja efektivnih pritisaka pa samim tim i rasterećenja zemljišta. Za vrednosti napona koje su manje od σ'_{zc} , umesto koeficijenta C_c uvodi koeficijent rekompresije C_r , koji je oko 5 do 10 puta manji od C_c (slika 3). Parametar (σ'_{zc}), se naziva efektivni napon prekonsolidacije i predstavlja vrednost maksimalnog prethodnog opterećenja tla. Treba imati u vidu da će se sa značajnim crpljenjem podzemne vode i smanjenjem pornih pritisaka, σ'_{zc} povećavati u vremenu. U modeliranju vertikalne jednodimenzionalne deformacije primenom nelinearnog modela, postoji nekoliko slučajeva koji su obuhvaćeni sledećim izrazima:

$$\varepsilon_z = \left\{ \begin{array}{l} \frac{C_r}{1 + e_0} \log\left(\frac{\sigma'_{z0} + \Delta\sigma'_z}{\sigma'_{z0}}\right) \quad , \quad \sigma'_{z0} + \Delta\sigma'_z \leq \sigma'_{zc} \\ \frac{C_r}{1 + e_0} \log\left(\frac{\sigma'_{zc}}{\sigma'_{z0}}\right) + \frac{C_c}{1 + e_0} \log\left(\frac{\sigma'_{z0} + \Delta\sigma'_z}{\sigma'_{zc}}\right) \quad , \quad \sigma'_{z0} < \sigma'_{zc} \wedge \sigma'_{z0} + \Delta\sigma'_z > \sigma'_{zc} \\ \frac{C_c}{1 + e_0} \log\left(\frac{\sigma'_{z0} + \Delta\sigma'_z}{\sigma'_{z0}}\right) \quad , \quad \sigma'_{z0} \geq \sigma'_{zc} \end{array} \right.$$

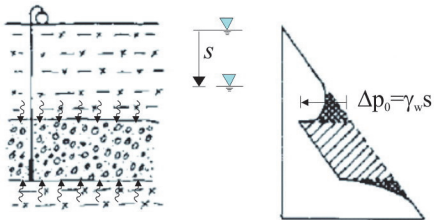
Prvi slučaj se odnosi na situaciju kada se ponovno opterećenje u potpunosti odvija u oblasti koja je manja od napona prekonsolidacije: $\sigma'_{z0} + \Delta\sigma'_z < \sigma'_{zc}$. Drugi slučaj je kada se ponovno opterećenje delimično odvija u zoni rekompresije a delimično u zoni napona koji su veći od napona prekonsolidacije: $\sigma'_{z0} < \sigma'_{zc} \wedge \sigma'_{z0} + \Delta\sigma'_z > \sigma'_{zc}$. Treći slučaj je kada se

povećanje $\Delta\sigma'_z$ odvija u potpunosti u zoni napona koji su veći od napona prekonsolidacije: $\sigma'_{z0} \geq \sigma'_{zc}$. Prethodnim jednačinama je obuhvaćen slučaj povećanja efektivnih napona ($\Delta\sigma'_z > 0$). Za simulaciju sleganja u vremenu, važan je i slučaj povećanja nivoa podzemne vode, što dovodi do rasterećenja i smanjenja efektivnih pritisaka ($\Delta\sigma'_z < 0$). U tom slučaju se za proračun koristi koeficijent C_r koji, ako se zanemari efekat histerezisa, obuhvata slučajeve i rasterećenja i rekompresije. Vertikalna deformacija u ovom slučaju će biti manja od 0.

$$\varepsilon_z = \frac{C_r}{1 + e_0} \log\left(\frac{\sigma'_{z0} + \Delta\sigma'_z}{\sigma'_{z0}}\right)$$

2.2. KONSOLIDACIJA

U slučaju zemljišta sa malim koeficijentom filtracije, nije moguće zanemariti vremensku komponentu sleganja. Sa sniženjem nivoa podzemne vode, dolazi do smanjenja pornih pritisaka na kontaktu između slabo propusnog (najčešće povlatnog) sloja i vodonosnog sloja. Zbog izmene graničnog uslova, povlatni sloj se polako „cedjuje“ u vodonosni u kome su porni pritisci sniženi (slika 4). Kao posledica toga, u slabije propusnom sloju se vremenom smanjuju porni i rastu efektivni pritisci tla, čime se stvaraju



Slika 4. Shematski prikaz konsolidacije podinskog i povlatnog sloja koje je posledica sniženja nivoa vode u vodonosnom sloju

uslovi za konsolidaciju. Uobičajan primer fenomena konsolidacije kod sniženja nivoa podzemne vode prikazan je na slici 4. Vodonosni sloj se nalazi između dva slabo propusna sloja (povlatni i podinski sloj). Rapored pritisaka vode (pornih pritisaka) je inicijalno hidrostatički. Nakon uključivanja bunara, dolazi do sniženjem nivoa podzemne vode u vodonosnom sloju za vrednost depresije s , što odmah dovodi do smanjenja pritiska vode u samom vodonosnom sloju, dok se slabije propusni slojevi polako dreniraju kroz ovaj sloj tako da do izmene pornih pritisaka u ovim slojevima dolazi znatno sporije. Za fenomen konsolidacije postoji analitičko Tercagijevo rešenje. Slabije propusni sloj je debljine B i koeficijenta filtracije k_z , i nalazi ispod vodonosnog sloja. Za potrebe proračuna se uvodi novi – sintezni parametar c_v - koeficijent konsolidacije (m^2/dan): $c_v = k_z M_v / \gamma_w$. Teorijsko rešenje, kao rezultat daje promenu pornog pritiska u vremenu $\Delta p(t)$ uprosečenu po debljini sloja širine B :

$$\Delta p(t) = \Delta p_0 U\left(\frac{t}{T}\right)$$

$$U\left(\frac{t}{T}\right) = 1 - 2 \sum_{n=1,3,\dots} \frac{\exp(-\pi^2 (n/2)^2 \frac{t}{T})}{\pi^2 (n/2)^2} \approx \left(\frac{4t}{\pi T}\right)^{0.5} \left(1 + \left(\frac{4t}{\pi T}\right)^{2.8}\right)^{-0.179}$$

gde je $T = B_{dr}^2 / c_v$. Dimenzija parametra T je vreme (dan). Za proračun parametra T , koristi se polovina debljine sloja B , ($B_{dr} = B/2$) u slučaju kada se on nalazi između dva vodonosna-drenažna sloja. Kada je drenažni sloj samo sa jedne strane sloja debljine B ,

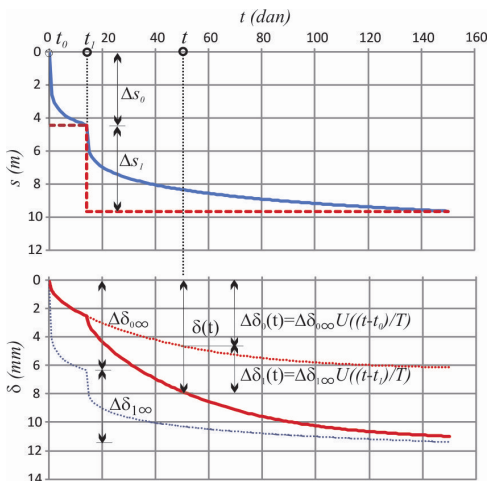
dužina dreniranja će odgovarati debljini celog sloja ($B_{dr}=B$). Bezdimenzionalna funkcija U , zapravo predstavlja odnos između konačne deformacije koje će se ostvariti na kraju perioda konsolidacije (teorijski u $t \rightarrow \infty$), i deformacije u nekom trenutku $t: U = \varepsilon_z(t) / \varepsilon_{z\infty}$. Za praktične potrebe proračuna konsolidacije, može se koristiti jednostavniji, približan izraz za proračun funkcije U (prikazan u prethodnoj jednačini), čija je greška 1% za opsege t/T manje od 0.9, i manja od 3% za opsege t/T koji su veći od 0.9 (Braja Das 2008).

Iako je teorijska osnova proračuna konsolidacije zasnovana na linearnom modelu sleganja, nelinearnost se u proračun uvodi kroz primenu prethodno opisanog nelinearnog (Tercagijevog) modela sleganja za određivanje vertikalne deformacije na kraju procesa konsolidacije: $\varepsilon_z(t) = \varepsilon_{z\infty} \cdot U(t/T)$, gde se $\varepsilon_{z\infty}$ računa iz jednačine 3, pri čemu se za promenu efektivnog napona uzima vrednost koja odgovara promeni pritiska na granici: $\Delta\sigma'_{z\infty} = \Delta p_0 = \gamma_w s_0$. Kako je vertikalna deformacija funkcija vremena, i sleganje ovog sloja (δ), će biti funkcija vremena: $\delta(t) = \varepsilon_z(t) \cdot B$.

Primena principa superpozicije u vremenu

Kada je potrebno simulirati sleganje tla u vremenu, za slojeve u kojima se to odvija trenutno, vrednost $\delta(t)$ jednostavno prati promenu nivoa podzemne vode (depresiju) u

vremenu $s(t)$. Međutim u slojevima u kojima dolazi do konsolidacije, potrebno je ove promene integraliti u vremenu. Najjednostavniji način da se to uradi je diskretizacija funkcije $s(t)$, koja se aproksimira stepenastom funkcijom, sačinjenom od niza uzastopnih promena Δs_i u diskretnim vremenskim intervalima t_i . Nakon diskretizacije primenjuje se princip superpozicije u vremenu (ovo je poznat koncept u dinamici podzemnih voda), po kome se u nekom vremenskom preseku t , sabiraju svi uticaji koji su se dogodili u prethodnim vremenskim trenucima ($t < t_i$). Na taj način se dobija sledeća, približna jednačina za proračun deformacije u vremenu:



Slika 5. Primena principa superpozicije u vremenu za proračun konsolidacije vodonosnom sloju

$$\varepsilon_z(t) = \sum_{\forall i, t_i < t} \varepsilon_{z\infty} (\Delta\sigma'_z(t_i)) \cdot U((t-t_i)/T) \text{ pri}$$

čemu se promena efektivnih napona u vremenskom preseku t_i računa na osnovu

promene nivoa podzemne vode: $\Delta\sigma'_{z\infty}(t_i) = \Delta s(t_i) \cdot \gamma_w$.

Na slici 5 je prikazano sniženje nivoa podzemne vode u vremenu ($s(t)$). Za potrebe proračuna konsolidacije primenom principa superpozicije, funkcija $s(t)$ je diskretizovana sa dve uzastopne promene (Δs_0 i Δs_1), na osnovu čega su sračunate konačne deformacije, odnosno sleganja ($\Delta\delta_{0\infty}$ i $\Delta\delta_{1\infty}$). Sleganje u trenutku t , se dobija sabiranjem parcijalnih sleganja $\Delta\delta_0(t)$ i $\Delta\delta_1(t)$, koje su posledica uzastopnih promena nivoa podzemne vode Δs_0 i Δs_1 . Poredjenja radi, na istoj slici je isprekidanom linijom prikazano sleganje koje bi se dobilo kada bi se zanemarila konsolidacija. Znači radi se o proračunu trenutnog sleganja, koje očigledno prati funkciju sniženja nivoa podzemne vode ($s(t)$) i naravno ima veće

vrednosti sleganja u odnosu na proračun u kome se vodi računa o efektu konsolidacije. U ovom primeru (slika 5) je samo ilustracije radi, data veoma grubo pojednostavljene funkcije $s(t)$, koja je aproksimirana sa samo 2 uzastopne promene. Jasno je da se sa povećanjem broja intervala povećava i tačnost proračuna.

3. PRIMER

Primena opisanog modela sleganja, pokazana je na primeru izgradnje i sanacije kanalizacionog kolektora prečnika 1200 mm, koji je deo Beogradskog kanalizacionog sistema. Ovim kolektorom se potrebljena voda vodi od Pančevačkog puta do KCS Krnjača 1. Dužina kolektora je oko 650 m, a dubina ukopavanja oko 6.5 metara. Usled visokog nivoa podzemne vode, bilo je neophodna izgradnja drenažnog sistema, kako bi se omogućilo izvođenje radova u suvom. Dunav se nalazi na udaljenosti od 920 m od najbliže tačke kolektora i postoji uticaj Dunava na nivo podzemne vode. Kako se nivo podzemne vode nalazi na svega oko 0.5 m od površine terena, konstrukcija kolektora je oko 6 m potopljena u vodi. Da bi radovi na sanaciji i izgradnji kolektora mogli da se odvijaju u suvom, projektovan je drenažni sistem čiji je zadatak bio da obezbedi obaranje nivoa podzemne vode sa kote 70.5 m na kotu 64.0 m, odnosno depresiju od oko 6.5 m na prostoru trase kolektora. Imajući u vidu uslove na terenu, projektovan je drenažni sistem od vertikalnih bunara prilično velikog kapaciteta (oko 15 l/s) koji će pratiti izvođenje radova u dve faze. Projektovano je da u jednom trenutku radi najviše 8 bunara, s tim što su 2 bunara zajednička za obe faze izgradnje.

Usvojen je pojednostavljen geološki profil koji se sastoji od 4 sloja čije su karakteristike date u tabeli 1. Teren je na koti 70.5 m, a ispod vodonosnog sloja 4 nalazi se nepropusna podloga.

Rezultati rada drenažnog sistema u dve faze, prikazani su na slici 6.



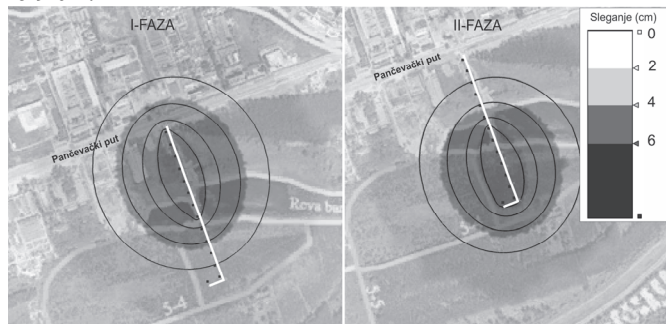
Slika 6. Sniženi nivo podzemne vode kao rezultat rada drenažnog sistema

Sleganja su računata na 6 m dubine od površine tla, koja odgovara koti 64.50 m što je približno kota na kojoj se nalazi dno kolektora. Ideja je da se proračunom sleganja na ovoj dubini mogu predvideti potencijalno kritična mesta za nastanak oštećenja na kolektoru. Sleganja na površini terena nisu od interesa jer se radi o području koje nije urbano, a i sleganja van zone rada drenažnog sistema su ravnomerna i znatno manja.

Tabela 1. Karakteristike pojedinačnih geoloških slojeva

Geološki sloj	B (m)	Kota dna (mnm)	γ_z (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	M_v (KN/m ²)
1. Nasuti material	1	69.5	19.0	14.5	3000
2. Gline i peskovite gline	4	65.5	19.5	15.5	6000
3. Sitnozrni, prašinsti peskovi	8	57.5	19.0	15.0	12000
4. Srednjezrni peskovi	12	45.5	20.0	15.0	22000

Zbog nedostatka raspoloživih podataka, kao i činjenice da se na dubinama većim od 6 metara nalazi vodonosni sloj, primenjen je najjednostavniji linearni elastični model trenutnog sleganja. Ukupna sleganja na nekoj dubini se određuju kao suma sleganja po slojevima 3 i 4. Na slici 7 su prikazani rezultati proračuna. Dobijena sleganja u zoni samog kolektora su oko 9 cm.



Slika 7. Rezultati proračuna sleganja kao posledica rada drenažnog sistema

4. ZAKLJUČAK

Sleganje, kao posledica sniženja nivoa podzemne vode, je u velikoj meri zanemaren problem. Iako već odavno postoje modeli za proračun dinamike podzemnih voda, proračun sleganja nije postao deo standardne prakse. Sa povećanjem korišćenja podzemne vode, a takođe i izgradnjom drenažnih sistema za potrebe izgradnje i/ili zaštite objekata, dolazi do sniženja nivoa podzemne vode koje znatno prevazilaze prirodan režim, zbog čega se kao prirodna i neminovna posledica javlja sleganje tla. Očigledna je potreba da se sleganje modelira i postane deo standardnih simulacionih modela za proračun dinamike podzemnih voda. U radu je dat opis jednostavnog jednodimenzionalnog modela za proračun vertikalnih deformacija, u kome se sleganje računa odvojeno od proračuna promene nivoa podzemne vode, odnosno nivoi podzemne vode su ulazna veličina za proračun sleganja. Zbog toga je ovaj pristup, iako pojednostavljen, pogodan za nadogradnju na postojeće modele dinamike podzemnih voda.

LITERATURA

- [1] H.P.Ritzema, Drainage principles and applications, ILRI, Wageningen, Netherlands, 1994.
- [2] J.Patrick Powers, Arthur B. Crowin, Paul C. Schmall, Walter E. Kaeck, Construction dewatering and Groundwater Control, John Wiley & Sons, 2007.
- [3] Maksimović M. (2001), *Mehanika tla*, Čigoja štampa, Beograd
- [4] Braja M. Das (2008), *Advanced Soil Mechanics*, Taylor & Francis
- [5] M.Budhu & I.Adiyaman (2010), Mechanics of land subsidence due to groundwater pumping, International Journal For Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2010; 34:1459-1478
- [6] Verujit A. (2006), *Soil Mechanics*, Delft University of Technology, Delft.
- [7] M.Stanić, *Drenažni sistemi u fazi gradnje objekata*, Građevinski kalendar, Beograd 2008.
- [8] D. Ivetić, M. Stanić, N. Jačimović (2013), Analiza sleganja terena usled sniženja nivoa podzemnih voda u fazi izvođenja građevinskih radova, XIII međunarodna konferencija "Vodovodni i kanalizacioni sistemi", Jahorina 2013, Udruženje za tehnologiju vode i sanitarno inženjerstvo